

彩色数码相机单幅 RGB 图像光谱重建研究

梁金星, 万晓霞

武汉大学印刷与包装系, 湖北 武汉 430079

摘要 通过彩色数码相机单幅 RGB 图像的响应值重建物体表面的光谱反射率, 不仅可以有效避免基于带通滤光片光谱成像系统存在的通道间图像像素偏移问题, 而且可以缩短图像采集周期和获得高空间分辨率的光谱图像, 但是光谱重建误差受光谱重建方法的影响。提出了一种基于相机响应值扩展和局部反距离加权优化的光谱重建方法, 以 CIEDE2000 色差和光谱均方根误差为评价指标, 以 600 个矿物颜料色块为实验样本, 利用佳能 600D 型数码相机对所提方法进行了验证, 并与当前几种较先进的方法进行了对比。实验结果表明, 所提方法的平均 CIEDE2000 色差和平均光谱均方根误差分别降低到 1.0389 和 0.0230, 所提方法的光谱重建精度优于当前几种较先进方法的光谱重建精度。

关键词 视觉光学; 光谱反射率重建; 响应值扩展; 局部反距离加权优化; 彩色数码相机

中图分类号 TP334.2⁺2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0933001

Spectral Reconstruction from Single RGB Image of Trichromatic Digital Camera

Liang Jinxing, Wan Xiaoxia

School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

Abstract Spectral reflectance reconstruction from a single RGB image of a trichromatic digital camera not only can effectively avoid the pixel distortion between the imaging channels existing in spectrum imaging system based on optical bandpass filters, but also can save the capturing time and acquire the spectral images with high spatial resolution. However, the spectral reconstruction error is influenced by reconstruction methods. A new spectral reconstruction method based on camera response expansion and local inverse distance weighted optimization is proposed. Using CIEDE2000 color difference and spectral root-mean-square error as the evaluated metrics, we use Canon 600D digital camera to verify the proposed method, and compare the proposed method with current advanced methods. The results show that the proposed method outperforms the several existing advanced methods, and average CIEDE2000 color difference and average spectral root-mean-square error of the proposed method decrease to 1.0389 and 0.0230, respectively.

Key words visual optics; spectral reflectance reconstruction; response expansion; local inverse distance weighted optimization; trichromatic digital camera

OCIS codes 330.1710; 330.6180; 330.1690; 330.7325

1 引 言

光谱成像技术的成像质量较高, 且具有图谱合一的功能, 在遥感、彩色成像、生物医疗、文化遗产和艺术品研究等领域得到了迅速发展^[1-3]。为了满足以上不同领域的应用需求, 形成了各种类型的光谱成像系统, 如相机-线阵扫描光谱仪、相机-滤光片轮、相机-带通滤光片(宽带或窄带)、相机-多光谱光源、单色相机-声光或液晶可调谐滤光片等^[4-8]。光谱成像系统从滤光片光谱特性上分为窄带和宽带两大类。对于基于光学带通滤光片的光谱成像系统, 由低维度的数字响应信号重建高维度光谱反射率信息是一个病态的数学求解过

收稿日期: 2017-03-20; **收到修改稿日期:** 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(61275172, 61575147)、国家 973 计划(2012CB725302)

作者简介: 梁金星(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光谱成像技术及应用方面的研究。E-mail: jxliang@whu.edu.cn

导师简介: 万晓霞(1965—), 女, 博士, 教授, 主要从事颜色技术方面的研究。E-mail: wan_whu@hotmail.com(通信联系人)

程,光谱重建方法是上述光谱成像系统的关键点。此外,光谱成像系统自身的复杂性以及不同型号滤光片本身厚度、折射率和非理想共面等因素的存在,导致不同滤光片对应的数字图像之间存在几何扭曲,降低了光谱成像的精度^[9]。

相对于彩色数码相机,基于光学带通滤光片的光谱成像系统的主要优势是通过配合滤光片来增加数字图像采集的通道数,为光谱重建提供更高维度的输入信息,从而提高光谱重建的精度。受此启发,诸多学者开展了利用彩色数码相机响应值扩展的方法实现物体表面光谱反射率重建的相关研究。Dupont^[10]提出利用多项式扩展和伪逆求解方法对三刺激值信号进行光谱重建;Heikkinen等^[11]利用奇异值求解和Tikhonov正则化方法解决了多项式扩展中数据过拟合的问题;Shen等^[12]通过偏最小二乘法求解光谱重建中训练样本的转换矩阵,进一步提高了光谱重建精度;Xiao和Zhang等^[13-15]分别将多项扩展与主成分特征向量空间、光谱色彩管理连接空间相结合,实现了基于彩色数码相机的光谱重建,获得了较好的光谱重建精度。然而,上述研究大多采用标准形式的多项式扩展模型,忽略了相机响应值扩展项数对光谱重建精度的影响,并且多以整个训练样本集来重建所有的测试样本,所有的训练样本的权重相同,忽略了训练样本的数量及其与测试样本之间的相关性对光谱重建精度的影响,制约了整体的光谱重建精度。

针对当前利用彩色数码相机进行光谱重建方法的不足,本文提出了一种基于响应值扩展和局部反距离加权优化的单幅RGB光谱重建方法,利用伪逆方法求解光谱重建转换矩阵,研究了局部训练样本数目、相机响应值扩展项数和反距离加权极小数值的选取对光谱重建精度的影响,并与上述方法进行了比较和讨论。

2 模型及方法

2.1 系统模型及光谱重建方法

假设彩色数码相机的光电转换函数为理想线性模型^[8],则对应一个像素点或一个样本的数码相机第*i*个通道的响应值为

$$d_i = \int l(\lambda) s_i(\lambda) o(\lambda) r(\lambda) d\lambda + b_i + n_i, \quad (1)$$

式中*d_i*为相机第*i*个通道的一个像素点或一个样本的响应值; λ 为波长, $l(\lambda)$ 为光源的相对光谱功率分布; $s_i(\lambda)$ 为相机第*i*个通道的光谱灵敏度函数; $o(\lambda)$ 为相机光学系统的透射率; $r(\lambda)$ 为一个像素点或一个样本的光谱反射率; b_i 和 n_i 分别为相机系统的暗电流噪声和固定模式噪声,可以通过去除暗电流和校正光照不均匀性来消除。忽略上述噪声参数,(1)式可以写成如下矢量矩阵的形式:

$$\mathbf{d} = \mathbf{M}\mathbf{r}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{d} 为一个像素点或一个样本的响应值矢量, \mathbf{M} 为包含了 $l(\lambda)$ 、 $s_i(\lambda)$ 、 $o(\lambda)$ 的相机系统整体灵敏度函数矩阵, \mathbf{r} 为一个像素点或一个样本的光谱反射率矢量。光谱重建过程就是通过(3)式从低维度的 \mathbf{d} 重建得到高维度的光谱反射率信息 \mathbf{r}_{rec} :

$$\mathbf{r}_{\text{rec}} = \mathbf{Q}\mathbf{d}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{r}_{rec} 为重建样本的光谱反射率矢量, \mathbf{Q} 为由训练样本数据通过相应算法计算得到的从相机响应值到光谱反射率转换的变换矩阵,光谱重建的精度取决于求解变换矩阵 \mathbf{Q} 使用的方法。如果在光谱重建之前相机系统的整体光谱灵敏度函数矩阵 \mathbf{M} 已经准确标定,则可以通过伪逆、主成分分析或维纳估计等方法^[16],由 \mathbf{d} 直接重建得到 \mathbf{r}_{rec} 。然而,由于相机系统的复杂性和系统参数的多样性,通常很难通过仪器准确标定相机系统的整体灵敏度函数矩阵 \mathbf{M} 。因此,当前研究大多采用基于训练方式的伪逆光谱重建方法,即

$$\mathbf{r}_{\text{rec}} = \mathbf{R}_{\text{train}} \mathbf{D}_{\text{train}}^+ \mathbf{d}, \quad (4)$$

式中上标+为伪逆运算符号, $\mathbf{R}_{\text{train}}$ 为训练样本集的光谱反射率矩阵, $\mathbf{D}_{\text{train}}$ 为训练样本集的相机响应值矩阵。本文采用基于训练的伪逆光谱重建方法开展相关研究。

2.2 基于训练的伪逆光谱重建方法

研究表明,采用彩色数码相机三个原始通道进行光谱重建,很难获得理想的重建精度^[17-18]。除了通过增加相机成像通道的物理方法提高光谱重建精度外,扩展相机响应项数的数学方法也是一个非常有效的方

法^[10-15]。(1)式假设数码相机的成像模型是理想的线性模型,但实际成像过程并非理想线性的,相机的参数设定以及图像增强处理步骤都会导致实际成像过程的非线性化^[19-20]。本研究将广泛用于彩色成像设备颜色特性化的多项式模型作为相机响应扩展的参考模型。此外,Zhang等^[14]的研究表明,当多项式阶数从三阶增加到四阶时,光谱重建精度的提升幅度非常小,本研究选择标准四阶多项式模型作为基本参考模型,研究数码相机光谱的重建。数码相机响应的四阶多项式扩展模型共包含35个扩展项:

$$\mathbf{d}_{\text{expanded}} = (1, r, g, b, rg, rb, gb, r^2, g^2, b^2, rg^2, r^2g, rb^2, r^2b, gb^2, g^2b, r^3, g^3, b^3, rgb, \rightarrow \\ \leftarrow rg^3, r^2g^2, rg^3, rb^3, r^2b^2, r^3b, gb^3, g^2b^2, r^3b, r^2gb, rg^2b, rgb^2, r^4, g^4, b^4), \quad (5)$$

式中 $\mathbf{d}_{\text{expanded}}$ 为一个像素点或一个样本的相机响应值的扩展响应向量,可通过 r 、 g 和 b 按照多项式模型扩展得到,等价于(2)~(4)式中的向量 \mathbf{d} 、 r 、 g 和 b 为一个像素点或一个样本的R通道、G通道和B通道的响应值。但如果采用(5)式中所有35个扩展项进行光谱重建,则可能出现文献[13]所述的数据过拟合问题。因此,在正式光谱重建之前,首先要确定最优响应扩展项数目。本研究通过测试4~35项的方法确定最优扩展项数:

$$\begin{aligned} 4 \text{ items: } \mathbf{d}_{\text{expanded}} &= (1, r, g, b), \\ 5 \text{ items: } \mathbf{d}_{\text{expanded}} &= (1, r, g, b, rg), \\ 6 \text{ items: } \mathbf{d}_{\text{expanded}} &= (1, r, g, b, rg, rb), \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ 35 \text{ items: } \mathbf{d}_{\text{expanded}} &= (1, r, g, b, rg, rb, gb, r^2, g^2, b^2, rg^2, r^2g, rb^2, r^2b, gb^2, g^2b, r^3, g^3, b^3, rgb, \rightarrow \\ &\leftarrow rg^3, r^2g^2, rg^3, rb^3, r^2b^2, r^3b, gb^3, g^2b^2, r^3b, r^2gb, rg^2b, rgb^2, r^4, g^4, b^4). \end{aligned} \quad (6)$$

对于基于训练方式的光谱重建方法而言:1)训练样本与测试样本之间的光谱和色度属性相似性决定光谱重建的精度,通常相似程度越高,重建精度越高,相似程度越低,重建精度越低;2)若训练样本集中的样本过多,就会导致颜色数据冗余,在增加计算量的同时也会略微降低光谱重建的精度;3)以整个训练样本集来重建所有的测试样本,所有训练样本的权重相同,而实际上距离重建样本越近的训练样本应赋予较大的权重。基于上述分析,本研究提出对训练样本集进行局部反距离加权优化,以提高重建样本集的整体光谱重建精度。首先,在RGB颜色空间上计算任一重建样本与训练样本集中所有样本的欧几里得距离:

$$e_j = \sqrt{(r_{\text{test}} - r_j)^2 + (g_{\text{test}} - g_j)^2 + (b_{\text{test}} - b_j)^2} \quad (j = 1, 2, \dots, N), \quad (7)$$

式中 r_{test} 、 g_{test} 和 b_{test} 为任一重建样本的R通道、G通道和B通道的响应值, r_j 、 g_j 和 b_j 为训练样本集中第 j 个训练样本的R通道、G通道和B通道的响应值, e_j 为任一重建样本与第 j 个训练样本之间的欧几里得距离, N 为训练样本数量。再根据训练样本集与重建样本欧几里得距离的大小,从小到大对训练样本集进行排序,提取前 p ($1 \leq p \leq N$)个训练样本作为局部最优训练样本集,并计算每个局部最优训练样本的反距离加权重 w_k :

$$w_k = \frac{1}{e_k + \sigma} \quad (k = 1, 2, \dots, p), \quad (8)$$

式中 e_k 为重建样本与局部最优训练样本集中第 k 个训练样本之间的欧几里得距离, σ 是为了避免(8)式出现分母为零而加入的一个极小数值。对于任一重建样本,其对应局部最优训练样本集的反距离加权重矩阵为

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 & & & \\ & w_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & w_p \end{bmatrix}_{p \times p} \quad (9)$$

最后,通过(10)式完成该重建样本光谱反射率的重建:

$$\mathbf{r}_{\text{rec}} = \mathbf{W} \mathbf{R}_{\text{localtrain}} (\mathbf{W} \mathbf{D}_{\text{localtrain}})^+ \mathbf{d}_{\text{expanded}}, \quad (10)$$

式中 $\mathbf{R}_{\text{localtrain}}$ 为局部最优训练样本集的光谱反射率矩阵, $\mathbf{D}_{\text{localtrain}}$ 为局部最优训练样本集的扩展响应矩阵。

3 实 验

3.1 实验样本

实验采用包含 600 个矿物颜料色块的样本集为研究对象,其中样本序数为奇数的样本构成训练样本集,样本序数为偶数的样本构成重建测本集。采用的分光光度计型号为 Eye-one Pro(X-Rite 公司,美国),测量获取 600 个色块样本在 380~730 nm 波长范围内的光谱信息。该设备采用 45°/0°测量条件,在测量中通过三次测量求平均的方法减小随机噪声引起的测量误差。同时,为去除在光谱曲线两端由系统误差造成的噪声,以 10 nm 为采样间隔,截取 400~700 nm 范围内的光谱反射率用于后续实验。训练样本集与重建样本集在 CIE1931 色度图中的分布如图 1(a)和图 1(b)所示,色度值的计算条件为 D50 标准光源和 CIE1931 标准观察者函数。

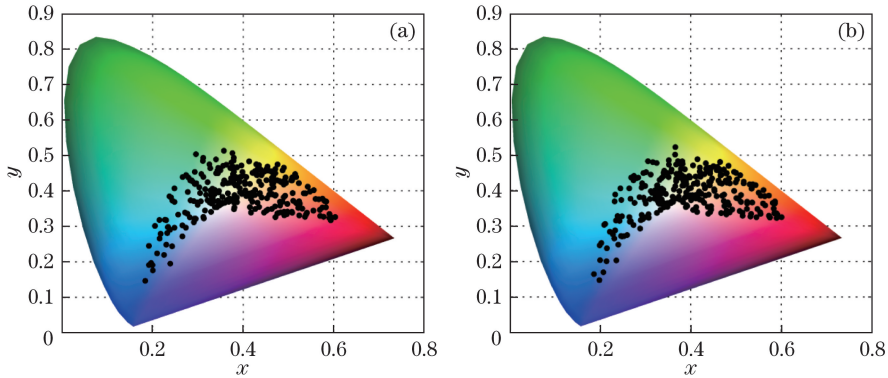


图 1 样本在 CIE1931 色度图中的分布。(a)训练样本集;(b)重建样本集

Fig. 1 Sample distributions in CIE1931 chromaticity diagram. (a) Training samples; (b) reconstruction samples

3.2 实验条件

实际实验在标准暗室内完成,利用平面式日光灯,以对称 45°方向均匀照射 600 个矿物颜料样本,照明距离为 2.2 m。使用的数码相机型号为 600D(佳能公司,日本),相机在与被拍摄平面垂直方向拍摄 600 个颜料样本,获取颜料样本的彩色数字图像,拍摄距离为 1.5 m,相机曝光时间为 1/20 s,光圈大小为 f/4,感光度 ISO 为 100,采用自动白平衡校正。通过盖上相机镜头盖获取相机系统的暗电流噪声,完成暗电流噪声校正。通过拍摄标准均匀灰板校正样本数字图像的光照不均匀性,校正方法见参考文献[18]。完成以上采集工作后,以 10 pixel×10 pixel 区域为模板,在 MATLAB 软件中提取每个颜料样本中心位置的数字响应均值,用于光谱重建测试研究。

3.3 评价指标

实验采用光谱均方根误差和 CIEDE2000 色差(Δ_{de2000})两个指标评价和比较不同方法光谱重建的精度。光谱均方根误差的计算公式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{K}(\mathbf{r}_{\text{rec}} - \mathbf{r}_{\text{ref}})^{\text{T}}(\mathbf{r}_{\text{rec}} - \mathbf{r}_{\text{ref}})}, \quad (11)$$

式中上标 T 为转置运算符号, \mathbf{r}_{ref} 为重建样本实际测量参考光谱反射率的矢量, K 为光谱反射率的采样波段数。本研究中,光谱反射率范围为 400~700 nm,间隔采样步长为 10 nm,因此 K 的取值为 31。CIEDE2000 色差的计算见参考文献[21]。

4 实验结果与讨论

先测试局部最优训练样本数目、相机响应扩展项数和极小数值 σ 的取值等因素对光谱重建精度的影响,再将本文方法与现有几种先进方法的光谱重建精度进行比较。针对本研究的实验样本,所有的对比方法均采用最优参数进行光谱重建计算。图 2 是极小数值取 0.001 时,相机响应在扩展项数为 4~35 的条件下,局部训练样本数量对光谱重建误差的影响。

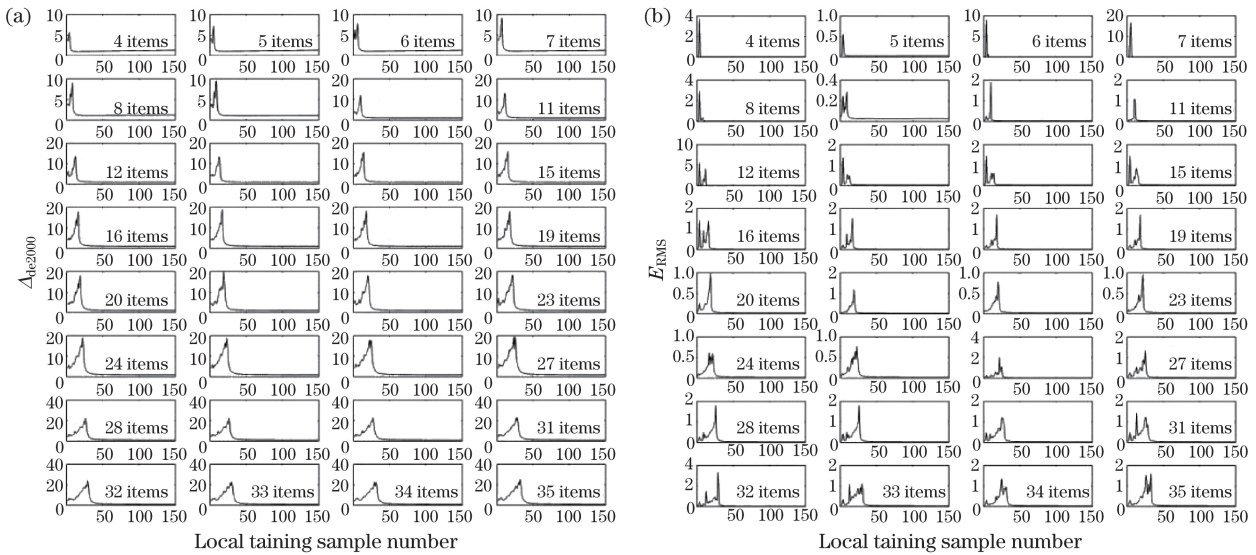


图 2 局部训练样本数量对光谱重建误差的影响。(a) CIEDE2000 色差;(b) 均方根误差

Fig. 2 Influence of the number of local training samples on spectral reconstruction errors.

(a) CIEDE2000 color difference; (b) root-mean-square error

由图 2 可知,相机响应在扩展项数为 4~35 的条件下,随着局部训练样本数量的增加,CIEDE2000 色差和光谱均方根误差的整体趋势都是先逐渐增大,然后快速减小,当局部训练样本数量达到 50 时,误差开始趋于平稳,当局部样本数量达到 100 时,误差已经十分稳定,之后随着局部训练样本数量继续增加,误差不在发生明显的变化。光谱重建误差在开始阶段的增加是由多项式扩展项数大于样本数量维度,求解转换矩阵时造成数据过拟合导致的,随着训练样本数量增加,转换矩阵求解的过拟合问题更加严重。因此,本研究取局部训练样本数量为 100,与现有方法的光谱重建精度进行比较。图 3 为极小数值取 0.001、局部训练样本数量为 100 时,相机响应扩展项数对光谱重建误差的影响。

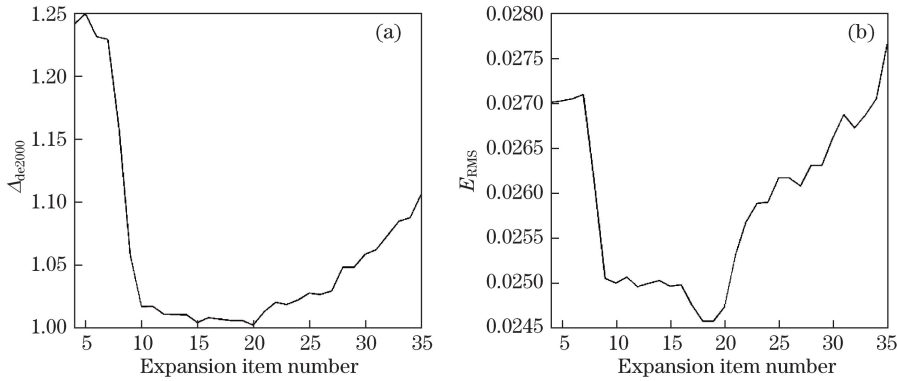


图 3 相机响应扩展项数对光谱重建误差的影响。(a) CIEDE2000 色差;(b) 均方根误差

Fig. 3 Influence of response expansion item number on spectral reconstruction errors.

(a) CIEDE2000 color difference; (b) root-mean-square error

由图 3 可知,随着相机响应扩展项数增加,CIEDE2000 色差和均方根误差均先逐渐减小,然后经历一个稳定的变化阶段,达到极小值后逐渐增大。造成上述现象的根本原因是:随着相机响应扩展项数增加,光谱重建数据会出现过拟合问题,使得所求解的光谱重建转换矩阵对重建样本的稳健性降低,从而增大了光谱重建误差,且相机响应扩展项数越大,过拟合问题越严重,光谱重建误差增大的幅度也就越大。基于上述分析,本研究取相机响应扩展项数为 19,与现有方法的光谱重建精度进行比较。图 4 是当局部训练样本数量为 100、相机响应扩展项数为 19 时,极小数值 σ 与光谱重建误差之间的关系。其中,极小数值的取值范围为 0.0001~0.01,步长为 0.0001。

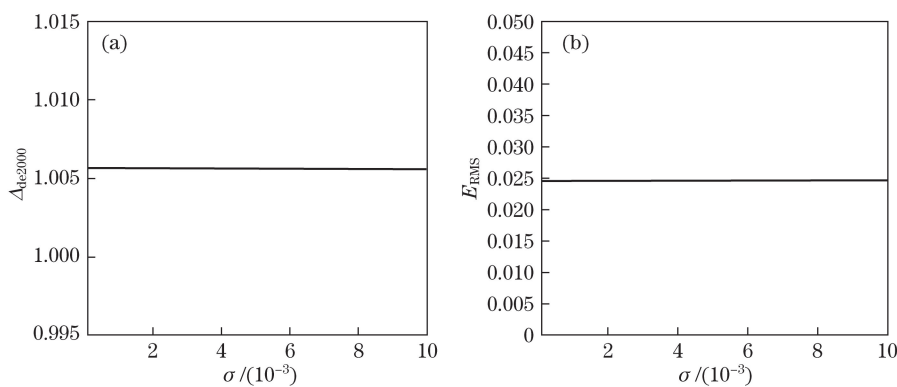


图 4 极小数值 σ 与光谱重建误差之间的关系。(a) CIEDE2000 色差；(b) 均方根误差

Fig. 4 Relationship between small value σ and spectral reconstruction errors.

(a) CIEDE2000 color difference; (b) root-mean-square error

由图 4 可知,极小数值的取值几乎不影响光谱重建的精度。因此,在测试局部最优训练样本数量和相机响应扩展项数对光谱重建精度的影响时,取极小数值 $\sigma=0.001$ 是合理的。表 1 为本文方法与几种现有研究方法的光谱重建结果比较,其中“RLS”、“PLS”、“Xiao”、“Zhang”分别表示前言中所述 Heikkinen、Shen、Xiao 以及 Zhang 等的方法。

表 1 本文方法与现有方法的光谱重建结果比较

Table 1 Comparison on spectral reconstruction results between the proposed and current existing methods

Method	Δ_{de2000}			E_{RMS}		
	Mean	Maximum	Standard deviation	Mean	Maximum	Standard deviation
RLS	1.2328	5.7986	0.7560	0.0288	0.1757	0.0228
PLS	1.2334	5.8023	0.7558	0.0288	0.1759	0.0228
Xiao	1.4502	8.0282	0.9467	0.0300	0.1860	0.0229
Zhang	1.2345	5.8020	0.7565	0.0314	0.1844	0.0234
Proposed	1.0389	8.3738	0.7379	0.0230	0.1361	0.0205

由表 1 可知,相比于现有的几种方法,本文方法在 CIEDE2000 色差方面和光谱均方根误差方面的光谱重建精度都取得了明显提高,光谱重建的平均色差值降低到 1.0389,平均光谱均方根误差降低到 0.0230。此外,虽然本文方法的最大色差与 Xiao 方法相当,且高于 RLS、PLS 和 Zhang 等方法,但最大光谱均方根误差相比现有几种方法约降低了 0.04 以上。为了更加客观地比较上述 5 种方法的光谱重建精度,对各方法光谱重建误差的样本数量分布进行了统计,统计结果如图 5 所示。

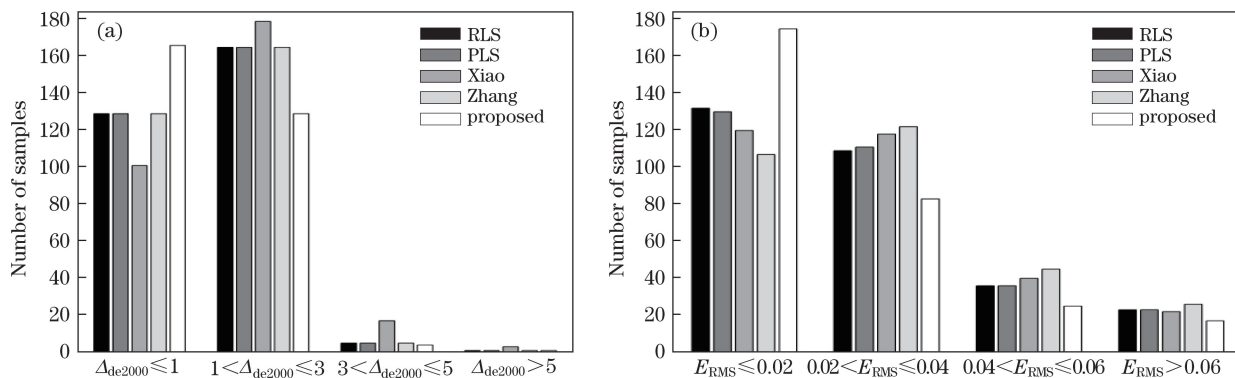


图 5 各方法重建误差的样本数量分布。(a) CIEDE2000 色差；(b) 均方根误差

Fig. 5 Samples number distribution of reconstruction errors of different methods.

(a) CIEDE2000 color difference; (b) root-mean-square error

由图 5 可知,与现有方法相比,本文方法明显具有更多数量的小误差样本和小色差样本。由此可知,本文方法在光谱重建精度上明显优于现有方法,证明了本研究中所提出的方法的优越性。

5 结 论

彩色数码相机在光谱成像领域具有广阔的应用前景,针对现有研究的不足,提出了一种基于相机响应值扩展和局部反距离加权优化相结合的光谱重建方法,并对该方法中影响光谱重建精度的因素进行了分析。通过具体实验将所提方法与现有方法进行了比较,所提方法光谱重建的平均 CIEDE2000 色差降低至 1.0389,平均光谱均方根误差降低至 0.0230,相比于现有方法,光谱重建精度得到明显提升,在彩色数码相机光谱成像领域具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Yuen P W T, Richardson M. An introduction to hyperspectral imaging and its application for security, surveillance and target acquisition[J]. *The Imaging Science Journal*, 2010, 58(5): 241-253.
- [2] Tominaga S, Tanaka N. Spectral image acquisition, analysis, and rendering for art paintings[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2008, 17(4): 043022.
- [3] Liang H. Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation[J]. *Applied Physics A*, 2012, 106(2): 309-323.
- [4] Barbin D F, Elmasry G, Sun D W, *et al.* Predicting quality and sensory attributes of pork using near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2012, 719(10): 30-42.
- [5] Berns R S, Taplin L A. Practical spectral imaging using a color-filter array digital camera[Z/OL]. [2017-03-18]. <http://www.art-si.org>.
- [6] Mathews S A. Design and fabrication of a low-cost, multispectral imaging system[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(28): 71-76.
- [7] Han S, Sato I, Okabe T, *et al.* Fast spectral reflectance recovery using DLP projector[C]. *Asian Conference on Computer Vision*, 2010: 323-335.
- [8] Hardeberg J Y, Schmitt F, Brettel H. Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(10): 2532-2548.
- [9] Brauers J, Schulte N, Aach T. Multispectral filter-wheel cameras: geometric distortion model and compensation algorithms[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(12): 2368-2380.
- [10] Dupont D. Study of the reconstruction of reflectance curves based on tristimulus values: comparison of methods of optimization[J]. *Color Research and Application*, 2002, 27(2): 88-99.
- [11] Heikkinen V, Jetsu T, Parkkinen J, *et al.* Regularized learning framework in the estimation of reflectance spectra from camera responses[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(9): 2673-2683.
- [12] Shen H L, Wan H J, Zhang Z C. Estimating reflectance from multispectral camera responses based on partial least-squares regression[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(2): 020501.
- [13] Xiao K, Zhu Y T, Li C J, *et al.* Improved method for skin reflectance reconstruction from camera images[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14934-14950.
- [14] Zhang X D, Wang Q, Li J C, *et al.* Estimating spectral reflectance from camera responses based on CIE XYZ tristimulus values under multi-illuminants[J]. *Color Research and Application*, 2017, 42(1): 68-77.
- [15] Chen Yiyi, Xu Haisong, Zhang Xiandou, *et al.* Study of spectral reconstruction based on digital camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1416-1419.
陈奕艺, 徐海松, 张显斗, 等. 基于数码相机的光谱重构研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1416-1419.
- [16] Cao B, Liao N F, Cheng H B. Spectral reflectance reconstruction from RGB images based on weighting smaller color difference group[J]. *Color Research and Application*, 2017, 42(3): 327-332.
- [17] Berns R, Taplin L, Nezamabadi M, *et al.* Modifications of a sinarback 54 digital camera for spectral and high-accuracy colorimetric imaging: simulations and experiments[Z/OL]. [2017-03-18]. <http://www.art-si.org>.
- [18] Liang J X, Wan X X, Liu Q, *et al.* Research on filter selection method for broadband spectral imaging system based on ancient murals[J]. *Color Research and Application*, 2016, 41(6): 585-595.

- [19] Cheung V, Westland S, Thomson M. Accurate estimation of the nonlinearity of input/output response for color cameras[J]. *Color Research and Application*, 2004, 29(6): 406-412.
- [20] Fang Jingyu, Xu Haisong, Wang Zhehong, *et al.* Homogeneous polynomial model for colorimetric characterization of camera with variable settings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0833002.
方竞宇, 徐海松, 汪哲弘, 等. 相机参数可变的齐次多项式色度特征化模型[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0833002.
- [21] Luo M R, Cui G, Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000[J]. *Color Research and Application*, 2001, 26(5): 340-350.